

**И.Г. Мироненко¹, С.Ф.Карманенко¹, А.А. Иванов¹, Д.В. Велькин²,
О.Ю. Буслов², А.А. Семенов¹, А.И. Дедык¹, Ю.В. Павлова¹,
И.Л. Мыльников¹, П.Ю. Белявский¹, А.А. Никитин¹, В.В. Витько¹,
А.Н. Ковдра¹**

¹ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

²ОАО "Завод Магнетон"

Многослойные нанокompозитные сегнетоэлектрики и элементы на их основе

В статье рассмотрены планарные структуры на многослойных нанокompозитных сегнетоэлектрических пленках с температурной стабилизацией их характеристик. Представлены расчетные и экспериментальные зависимости емкости планарных конденсаторов. Проведена оценка фазовой скорости распространения электромагнитной волны в многощелевой структуре. Получены практические характеристики СВЧ фазовращателя отражательного типа на многослойной нанокompозитной сегнетоэлектрической пленке.

Ключевые слова: нанокompозитная сегнетоэлектрическая пленка, многощелевая линия, планарный конденсатор, планарный фазовращатель.

По мере роста значения систем связи, локации и навигации в СВЧ диапазоне повышаются требования к их надежности, мобильности, энергопотреблению. В телекоммуникационных, навигационных системах возникает потребность применения ЭРЭ с электрически управляемыми характеристиками. Эта потребность может быть обеспечена с помощью компонентов на основе пленочных материалов с нелинейными электрофизическими свойствами. В качестве таких материалов могут быть выбраны сегнетоэлектрики. Управление параметрами радиоэлектронных компонентов, созданных на основе сегнетоэлектриков, осуществляется за счет изменения их диэлектрической проницаемости под действием внешнего электрического поля. Свойство управляемости под действием электрического поля сохраняется у ряда сегнетоэлектриков в широком частотном диапазоне – от низких до сверхвысоких и крайневых частот. Это свойство может быть использовано в СВЧ технике для быстрой перестройки амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик.

Сдерживающим фактором широкого практического применения сегнетоэлектрических пленок является температурная зависимость их диэлектрической проницаемости и, как следствие, температурная зависимость характеристик устройств, созданных на их основе. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков является их принципиальным свойством, которое проявляется во взаимосвязи нелинейности диэлектрической проницаемости по электрическому полю и температуры. Снижение крутизны температурной зависимости приводит к уменьшению управляемости электрическим полем, а, следовательно, к ограничению функциональных возможностей устройств на сегнетоэлектрических пленках.

1. Наноконпозитные СЭП в планарных конденсаторах

Многолетние экспериментальные исследования и поиск компромисса между зависимостью диэлектрической проницаемости от температуры и электрического поля в сегнетоэлектрических материалах и технически приемлемыми диэлектрическими потерями в диапазоне сверх-и крайневых частот привели к использованию сегнетоэлектриков на основе твердого раствора $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BSTO) при $x = (0.4-0.5)$ с различными легирующими добавками, где x – концентрационная зависимость, показывающая соотношение между содержанием бария и стронция. На рис.1 представлена зависимость диэлектрической проницаемости BSTO структуры от температуры. Данная зависимость описывается законом Кюри – Вейса. Увеличение концентрации “ x ” в составе сегнетоэлектрической структуры BSTO приводит к смещению максимума диэлектрической проницаемости в сторону высоких температур. Таким образом, необходимость температурной стабилизации устройств на основе сегнетоэлектрических пленок становится неизбежным обстоятельством при конструировании устройств.

Относительная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков типа BSTO, как видно из рис.1., находится в диапазоне значений порядка 10^3 , и по этой причине в СВЧ диапазоне сегнетоэлектрики могут быть использованы только в виде пленок, нанесенных на диэлектрическую подложку. Существуют различные технологии получения тонких сегнетоэлектрических пленок (СЭП) на диэлектрических поверхностях. Выбор технологии получения СЭП обуславливается конкретной задачей при создании радиоэлектронного элемента (компонента) интегральной схемы. В нашей работе мы применяли ВЧ магнетронное распыление из твердотельных мишеней.

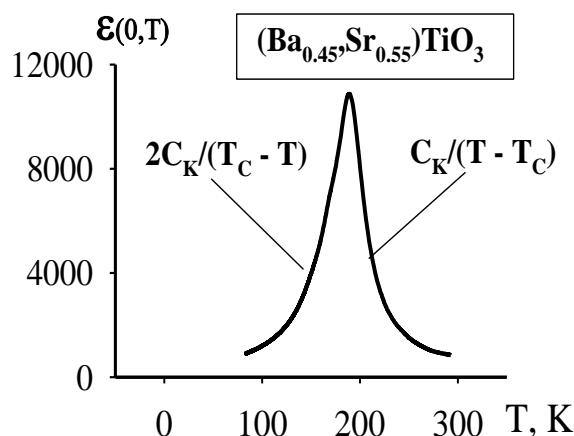


Рисунок 1. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости

Достижение температурной стабилизации диэлектрической проницаемости СЭП заключается в комплексном методе распыления на диэлектрическую подложку из твердотельных мишеней, каждая из которых имеет свой компонентный состав. Полученная диэлектрическая структура “наноконпозитная сегнетоэлектрическая пленка - диэлектрическая подложка” представляет собой конструкцию, в которой возможность управления диэлектрической проницаемостью технически осуществима лишь с помощью электродов, нанесенных с одной или двух сторон на поверхность наноконпозитной СЭП. В качестве материала электродов могут использоваться материалы с высокой удельной проводимостью или пленки высокотемпературных сверхпроводников. Очевидно, что

подобная нанокompозитная СЭП может применяться в различных конструктивных вариантах, поперечные сечения которых представлены на рис.2.

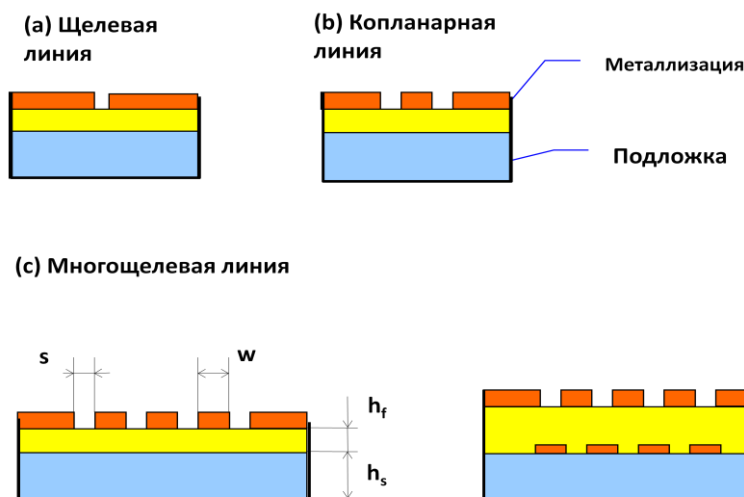


Рисунок 2. Поперечные сечения щелевых структур

При проектировании СВЧ устройств нанокompозитные СЭП структуры могут использоваться в конструкции планарных перестраиваемых конденсаторов и в линиях передачи с перестраиваемой фазовой скоростью электромагнитной волны.

На рис.3. и рис.4. показаны температурные зависимости емкостей планарных многощелевых конденсаторов. Встречно-щелевые металлические структуры электродов конденсаторов с шириной зазоров равной ширине щелей (7 мкм), сформированы на поверхности нанокompозитной СЭП состоящей из 25 слоев суммарной толщиной 750 нм, напыленной на сапфировую подложку толщиной 0,5 мм. Длина зазора конденсатора, представленного на рис. 2.с составляет 400 мкм, и 750 мкм. Как видно из рис.3 и рис.4, в диапазоне температур от -70°C до $+85^{\circ}\text{C}$ разброс емкости при отсутствии напряжения управления составляет не более $\pm 6\%$, а при подаче напряжения разброс по емкости существенно уменьшается. Для рассмотренной нанокompозитной пленки коэффициент управления по емкости имеет величину приблизительно равную двум при напряженности поля на зазоре 25В/мкм. Нами получены образцы планарных конденсаторов с различными коэффициентами управления емкостью. В зависимости от состава многослойной нанокompозитной пленки и технологии ее изготовления коэффициент перестройки по емкости может достигать семи.

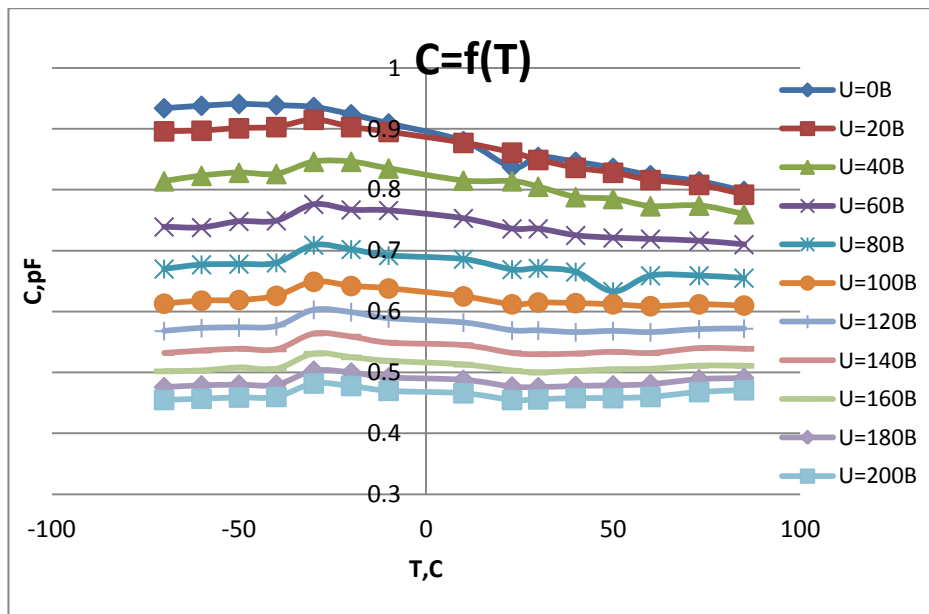


Рисунок 3. Емкость планарного конденсатора на 25 слойной нанокompозитной пленке при разном управляющем напряжении

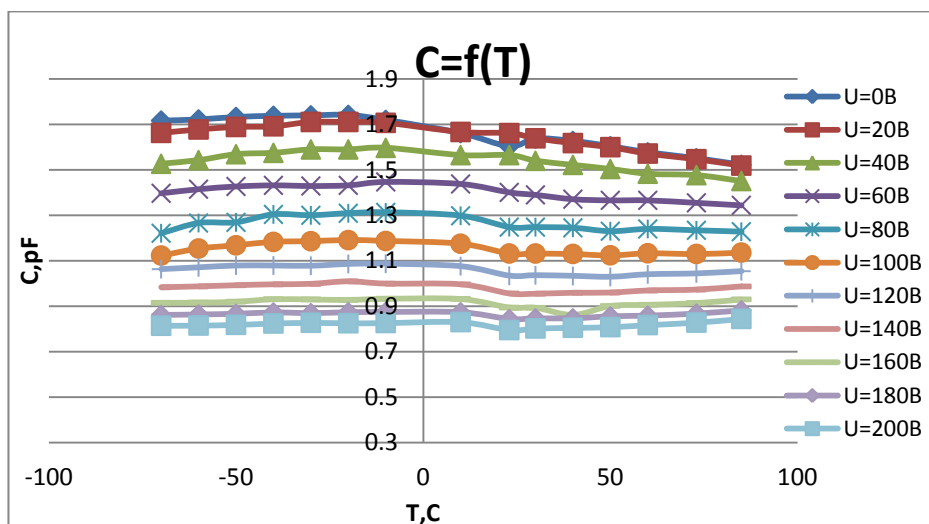


Рисунок 4. Емкость планарного конденсатора на 25 слойной нанокompозитной пленке при разном управляющем напряжении

Одним из параметров, характеризующих нанокompозитную СЭП, является тангенс угла диэлектрических потерь. Для представленных структур во всем температурном диапазоне на частоте 1 МГц тангенс диэлектрических потерь не превышал 2×10^{-3} без напряжения, а с подачей управляющего напряжения его значение уменьшалось до 10^{-4} и ниже.

Проведенные исследования конденсаторных структур на старение показали, что за 180 суток изменение емкости находится в пределах погрешности измерительных приборов.

Испытания на деградацию структуры при длительном воздействии трехкратного повышенного напряжения управления не выявили разрушения структуры и ухода первоначального значения емкости.

Конденсаторные структуры на нанокompозитной СЭП изготавливались интегральным методом на подложке площадью $30 \times 48 \text{ мм}^2$. На ней было сформировано более шестисот планарных многощелевых встречно штыревых конденсаторов, и разброс их емкостей составил менее 1%, что говорит о равномерности нанокompозитной структуры, полученной методом магнетронного ВЧ распыления.

Близость расчетной модели и реально изготовленной конструкции конденсатора иллюстрирует рис.5. На нем показана зависимость емкости от температуры и управляющего напряжения в планарном щелевом конденсаторе на семислойной нанокompозитной СЭП с шириной зазора между электродами 14 мкм и длиной 0.8 мм.

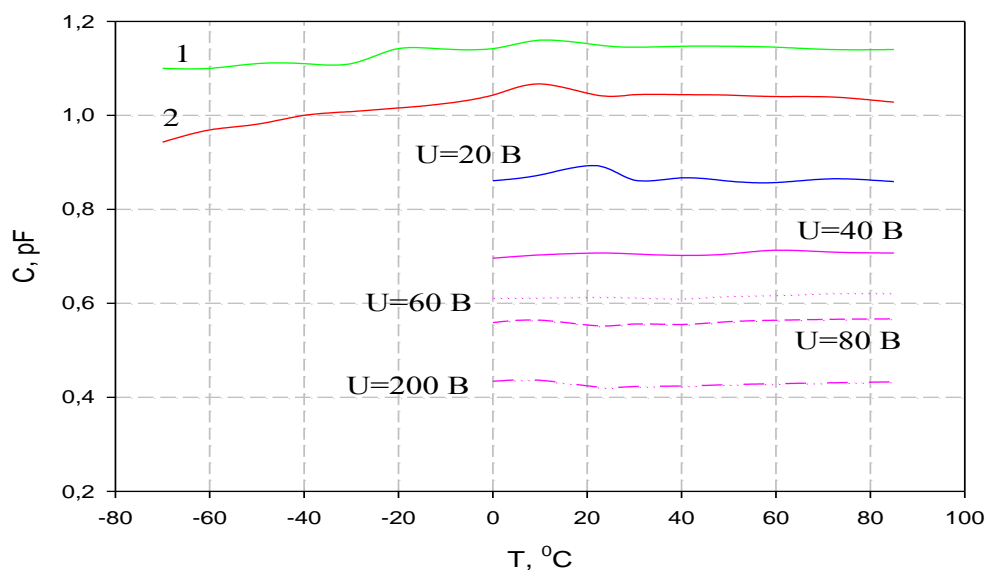


Рисунок 5. Емкость планарного конденсатора на семислойной нанокompозитной пленке при разном управляющем напряжении

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что многослойные нанокompозитные сегнетоэлектрические структуры являются основой для создания новых конденсаторных ЭРЭ с электрически перестраиваемой емкостью, выполненных в виде корпусных (бескорпусных) элементов, сосредоточенных элементов интегральной схемы или в виде распределенных многощелевых структур.

2. Нанокompозитные СЭП в линиях передачи

На рис.6 и рис.7. приведены результаты расчетов постоянной распространения электромагнитной волны в многощелевой линии передачи (рис. 3.с.) в широком температурном диапазоне для различных значений ширины щелей и электродов, при различном управляющем напряжении. Из графиков видно, что при значении управляющего напряжения на электродах линии в 100 В величина постоянной распространения изменилась приблизительно в 1,4 раза. Основываясь на предыдущих теоретических и практических данных, можно утверждать, что разброс постоянной распространения в рассматриваемом температурном диапазоне будет ниже расчетного. Следует отметить, что каждый слой в составе нанокompозитной пленки может иметь толщину не менее 10 нм и вносить свой вклад в формирование электромагнитного поля и температурной стабильности фазовой скорости.

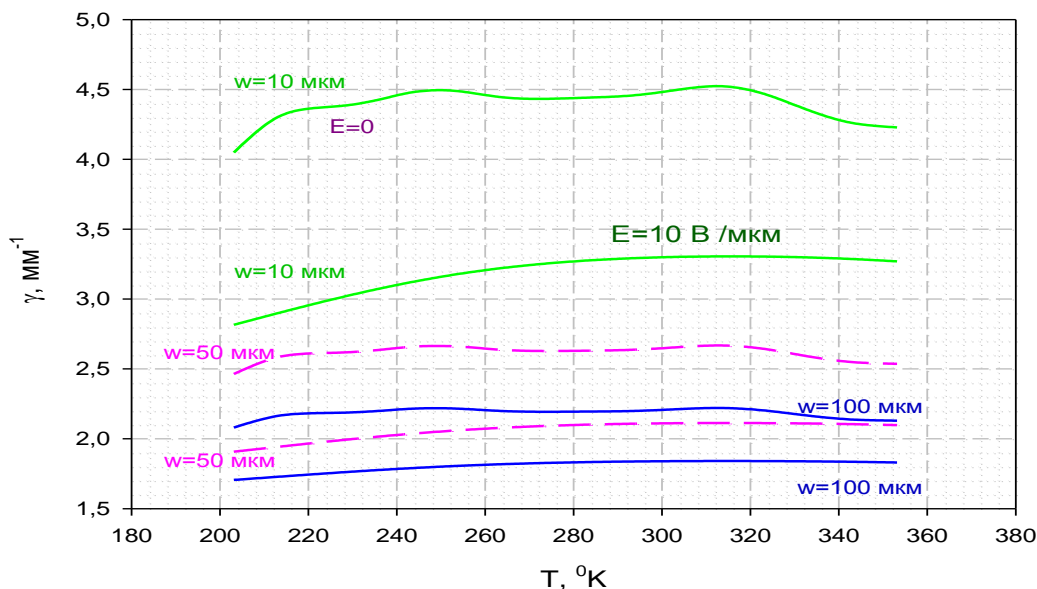


Рисунок 6. Теоретическая зависимость постоянной распространения от температуры в многослойной линии (три электрода) в структуре «нанокompозитная СЭП - диэлектрическая подложка», $d_{\text{пл}}=0.3\text{мм}$, $d_{\text{пл}}=1.45 \text{ мкм}$, $f=30\text{ГГц}$

Эффект температурной стабилизации достигается за счет распределения электромагнитного поля по толщине нанокompозитной пленки. При этом каждый нанослой сохраняет свойства сегнетоэлектрика с присущей ему температурной и полевой зависимостью диэлектрической проницаемости. Рис.7. иллюстрирует расчетную зависимость постоянной распространения в многослойной линии на частоте 100ГГц .

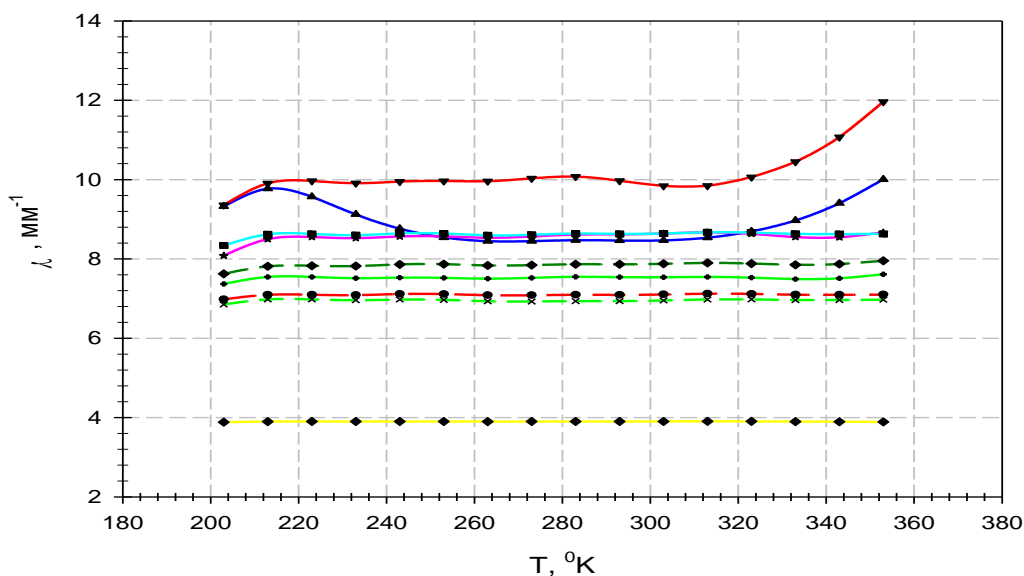


Рисунок 7. Теоретическая зависимость постоянной распространения от температуры в многослойной линии (три электрода) $w=h=50\text{мкм}$ в структуре «нанокompозитная СЭП - диэлектрическая подложка», $d_{\text{пл}}=0.17\text{мм}$, $d_{\text{пл}}=0.75 \text{ мкм}$, $f=100\text{ГГц}$

Измерения характеристик нанокompозитных сегнетоэлектрических пленок на СВЧ выполнялись в диапазоне $25 \text{ ГГц} - 35 \text{ ГГц}$ резонансными методами: в полуволновом объемном резонаторе, и измерение в щелевом резонаторе. Экспериментальные результаты позволили получить объективное значение собственной добротности, которая на частоте 30 ГГц составила примерно 102 . Коэффициент управления диэлектрической проницаемостью, полученный при измерении в щелевой резонаторе не меньше двух.

На основе многослойных линий передачи были разработаны фазовращатели отражательного и проходного типа. Конструкция фазовращателя отражательного типа показана на рис. 8.

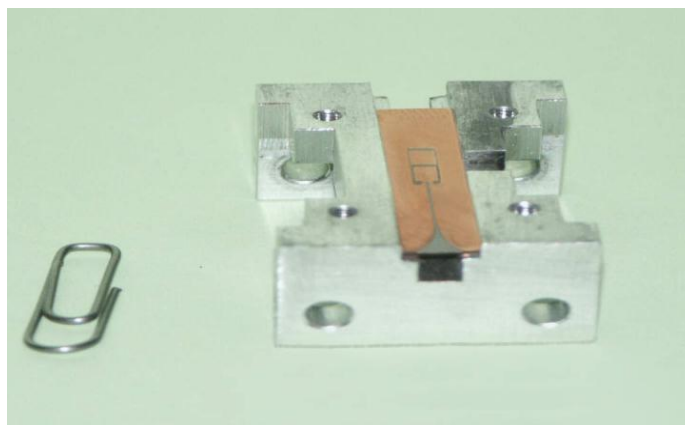


Рисунок 8. Макет фазовращателя отражательного типа

Измеренные характеристики фазовращателя представлены в таблице.

Рабочая частота –	30 ГГц;
Плавное управление фазой -	0 – 370.8
Вносимые потери на рабочей частоте –	не более 3.5 дБ
Время установки значения фазового сдвига -	менее 1 мкс
Фазовые шумы –	не более 100 дБ/Гц

Полученные теоретические и практические результаты подтверждают правильность выбранного направления в развитии технологии нанокompозитных сегнетоэлектрических структур как базовых при разработке элементов для техники различного функционального назначения.